

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Mihael Karačić**

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentorica:

Doc. dr. sc. Ana Pilipović

Student:

Mihael Karačić

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici doc. dr. sc. Ani Pilipović na njezinoj susretljivosti i stručnim savjetima kojima je formirala ideju završnog rada, te pomogla u izradi istoga.

Zahvaljujem se asistentici mr. sc. Maji Rujnić Sokele, dipl. ing. na iskazanom trudu i zalaganju pri pisanju završnog rada.

Također zahvaljujem se svojim roditeljima, sestr i prijateljima koji su mi bili oslonac i podrška tijekom cijelog studiranja kao i kod pisanja završnog rada.

Mihael Karačić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MIHAEL KARAČIĆ** Mat. br.: 0035192569

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PRIRODNA VLAKNA U INDUSTRIJI POLIMERNIH KOMPOZITA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **NATURAL FIBRES IN POLYMER COMPOSITE INDUSTRY**

Opis zadatka:

Proizvodnja sirovina, materijala i proizvoda, njihova uporaba i odlaganje imaju značajan gospodarski i ekološki utjecaj. Iskoristivost sirovina i ekološka prihvatljivost mogu se povećati zatvaranjem kruga, tj. stvaranjem oporabljivoga i trajnoga proizvoda, ali isto tako i uporabom obnovljivih izvora sirovina. Zbog toga je upotreba prirodnih vlakana u kompozitima u neprestanomu rastu. Postoji velik broj biljnih kultura koje su pogodne za dobivanje prirodnih vlakana. Treba ih sve uzeti u obzir prilikom promišljanja o uzgoju, jer svaka od njih ima određene prednosti pred drugom. Bitna je i potražnja za pojedinim vlaknima na tržištu.

U završnom radu potrebno je obraditi područje prirodnih vlakana za primjenu u polimernim kompozitima. U okviru rada potrebno je opisati najvažnije vrste prirodnih vlakana, navesti njihova najvažnija područja primjene i mogućnosti proizvodnje.

Zadatak zadan:  
30. studenog 2016.

Rok predaje rada:  
1. rok: 24. veljače 2017.  
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.  
3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:  
1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.  
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.  
3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadatak zadao:

*Ana Pilipović*  
Doc. dr. sc. Ana Pilipović

v.d. predsjednika Povjerenstva:

*Branko Bauer*  
Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA.....	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA.....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY.....	VII
1. UVOD.....	1
2. OPĆENITO O KOMPOZITIMA.....	3
2.1. Podjela kompozita.....	6
2.2. Matrica kompozita.....	8
2.3. Ojačavala.....	8
2.4. Prednosti kompozitnih materijala.....	10
3. KOMPOZITI OJAČANI PRIRODNIM VLAKNIMA.....	11
3.1. Podjela prirodnih vlakana.....	11
3.2. Prednosti i nedostaci prirodnih vlakana.....	12
3.3. Zamjena sintetskih vlakana.....	13
4. PRIRODNA VLAKNA.....	15
4.1. Bambus.....	15
4.1.1. Kompoziti s bambusovim vlaknima.....	18
4.1.2. Primjena kompozita ojačanih bambusovim vlaknima.....	21
4.2. Banana.....	22
4.2.1. Struktura vlakana banane.....	23
4.2.2. Mehanička svojstva vlakana banane.....	24
4.2.3 Primjena vlakana banane u polimernim kompozitima.....	25
4.3. Lan.....	
4.3.1. Struktura vlakana lana.....	28
4.3.2. Kompoziti ojačani prirodnim vlaknima lana.....	29
4.3.3. Primjena vlakana lana u kompozitima.....	31
4.4. Industrijska konoplja.....	33
4.4.1. Struktura vlakana industrijske konoplje.....	36
4.4.2. Kompoziti od prirodnih vlakana industrijske konoplje.....	39
4.4.3. Primjena vlakana industrijske konoplje u kompozitima.....	41
5. ZAKLJUČAK.....	45
6. LITERATURA.....	46

**POPIS SLIKA**

Slika 1.1. Svjetska godišnja potrošnja kompozitnih materijala .....	2
Slika 2.1. Prvi kompoziti opeke u drevnom Egiptu .....	3
Slika 2.2. Mongolski luk .....	4
Slika 2.3. Kompoziti u automobilske industrije: a) Automobil Henryja Forda, b) Trabant .....	4
Slika 2.4. Svjetska godišnja potrošnja kompozitnih materijala .....	5
Slika 2.5. Struktura kompozita .....	5
Slika 2.6. Podjela kompozita s obzirom na matricu i ojačavala .....	6
Slika 2.7. Ponašanje kompozita ovisno o sastojcima (raspored, udio, usmjer, oblik i veličina) .....	7
Slika 2.8. Podjela kompozita prema ojačavalu: a) kompozit ojačan česticama, b) kompozit ojačan vlaknima, c) strukturni kompoziti .....	9
Slika 3.1. Vrste prirodnih vlakana .....	12
Slika 4.1. Plantaža bambusa u Kini .....	15
Slika 4.2. Tri ključna elementa u stvaranju održivog proizvoda .....	17
Slika 4.3. Profil za građevinsku industriju izrađen od kompozita s bambusovim vlaknima .....	19
Slika 4.4. Ploča za pokrivanje krovova izrađena od kompozita s bambusovim vlaknima .....	19
Slika 4.5. Proces ispitivanja trupa broda od kompozita s bambusovim vlaknima namijenjen za vodene sportske aktivnosti .....	20
Slika 4.6. Primjena kompozita ojačanog bambusovim vlaknima u raznim područjima primjene .....	21
Slika 4.7. Plantaža banana .....	22
Slika 4.8. Podmetači od vlakana banane u Fordu Lincolnu .....	25
Slika 4.9. Pokrovni materijal od vlakana banane .....	25
Slika 4.10. Polje lana na našim prostorima .....	26
Slika 4.11. Struktura lanenog vlakna .....	28
Slika 4.12. Primjena lana u zimskim sportovima .....	31
Slika 4.13. Upotreba lanenih vlakana u proizvodnji dijelova za automobil Mercedes-Benz E-Class .....	32
Slika 4.14. Industrijska konoplja .....	33

Slika 4.15 Biorazgradivi ciklus i standardni ciklus .....	35
Slika 4.16. Utrošak enegije za uzgoj i obradu konoplje izražen u gigadžulima po toni – GJ/t .....	36
Slika 4.17. Shematski prikaz sastav vlakna industrijske konoplje od stabla pa sve do mikrovlakana .....	37
Slika 4.18. Raznolikost uporabe pojedinih dijelova industrijske konoplje .....	38
Slika 4.19. Primjer poprečnog presjeka stabla industgrijske konoplje (lijevo ) i indijske konoplje koja se koristi kao droga ( desno ) [.....	39
Slika 4.20. Prva karoserija od konoplje automobila Henry Forda .....	42
Slika 4.21. Automobil Lotus-Eco-elise napravljen od kompozita konoplje .....	42
Slika 4.22. Ulični namještaj proizveden konopljinim vlaknima .....	43
Slika 4.23. Parna pegla s 30 % vlakana konoplje .....	44
Slika 4.24. Fotelja od kompozita s konopljinim vlaknima .....	44
Slika 4.25. Tenisice od kompozita s konopljinim vlaknima .....	44
Slika 4.26. Maska za mobitel od kompozita s konopljinim vlaknima .....	46

---

**POPIS TABLICA**

Tablica 4.1 Kemijska svojstva prirodnih vlakana .....	23
Tablica 4.2 Postotak vlage i gustoća prirodnih vlakana .....	23
Tablica 4.3. Mehanička svojstva različitih prirodnih vlakana .....	24
Tablica 4.4. Pregled svojstava vlakana lana .....	30
Tablica 4.5. Svojstva vlakana konoplje .....	41
Tablica 4.6. Gustoća i modul rasteznosti prirodnih vlakana .....	41



---

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
m	kg	masa prirodnih vlakana
T	°C	temperatura
CO <sub>2</sub>	/	ugljikov dioksid
L	m	dužina vlakana
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća vlakana
D	mm	promjer vlakana
Rm	MPa	rastezna čvrstoća vlakana
E	GPa	modul rasteznosti vlakana
THC		tetrahidrokanabinol
Ep	GJ/t	utrošak energije u proizvodnji vlakana
PUR		poliuretan
PVC		poli(vinil-klorid)
PES		poli(eter-sulfon)

---

**SAŽETAK**

Tema završnog rada su prirodna vlakna u industriji polimernih kompozita. Tema daje uvid u mogućnosti primjene prirodnih vlakana u polimernim kompozitima, njihove prednosti i nedostatke. Navode se biljke koje su najprikladnije za takvu primjenu od kojih su izdvojene: bambus, banana, lan i industrijska konoplja. Za svaku od ovih biljaka prikazana je njihova primjena i mehanička svojstva.

---

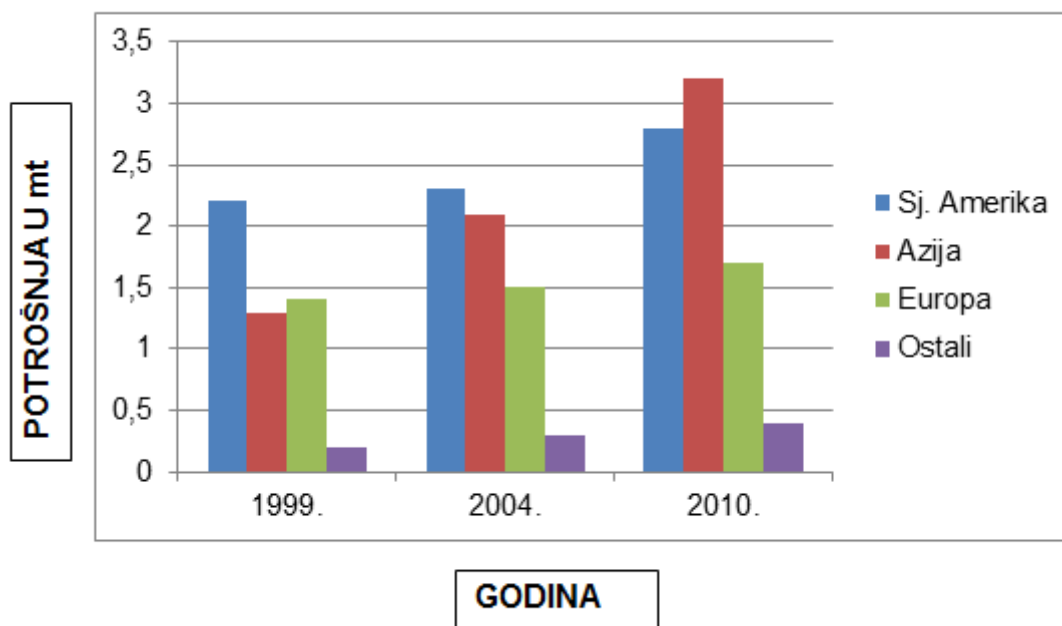
**SUMMARY**

Dissertation is about natural fibers in polymer composites industry. The theme gives insight into the possibilities of using natural fibers in polymer composites, their advantages and disadvantages. It names the plants that are the most convenient for such applications of which are distinguished: bamboo, banana, flax and industrial hemp. For each of these plants an insight into their use and their mechanical properties is given.

## 1. UVOD

Rastuća globalna briga za okoliš, visoka stopa iscrpljivanja naftnih resursa, kao i neekološki propisi prisiljavaju na potragu za novim materijalima koji su kompatibilni s okolinom. Prirodna vlakna predstavljaju ekološki prihvatljivu alternativu. Posljedica današnjeg načina života i razvoja civilizacije je onečišćenje okoliša zbog odlaganja velikih količina otpada koji nastaje tijekom procesa proizvodnje, te nakon odlaganja proizvoda. Važno je istaknuti da je danas prevladala spoznaja kako je otpad najčešće važan izvor visokovrijednih sirovina iz kojih se različitim postupcima oporabe dobiva novi proizvod jer otpad čine različite vrste materijala kao što su metal, plastika i plastični proizvodi. [1]

Zbog zaštite okoliša i održivosti, u ovom stoljeću je došlo do izvanrednog uspjeha i napretka zelene tehnologije u području znanosti o materijalima kroz razvoj biokompozita. Razvoj visokih performansi materijala izrađenih od prirodnih vlakana je u porastu u cijelom svijetu. Najveći izazov u radu s prirodnim vlaknima ojačanih polimernih kompozita je njihovo veliko odstupanje u svojstvima i karakteristikama. Svojstva kompozita su pod utjecajem niza varijabli, uključujući vrstu vlakana, uvjete okoline, postupaka prerade i sl. Za razliku od samih početaka kada su se kompoziti masovnije počeli primjenjivati u automobilske industriji, taj trend sve više zahvaća i ostale grane industrije. Rast uporabe kompozita najbolje se vidi na slici 1.1. Trend primjene ovih materijala je u stalnom porastu, ne samo zbog njihovih svojstava, već i zbog njihove mogućnosti oporabe, a samim time i mogućnosti održive proizvodnje. Uporabom prirodnih vlakana može se potaknuti i poljoprivredna industrija. [1]



Slika 1.1. Svjetska godišnja potrošnja kompozitnih materijala [2]

Istraživanja o raznim dostupnim vrstama prirodnih vlakana i primjene tih vlakana kao održiva alternativa sintetskim vlaknima znači ujedno i brigu u vidu zaštite okoliša. Svojstva nekih prirodnih vlakana za ojačavanje koja se primjenjuju u kompozitima, uključujući vrstu, strukturu, sastav, kao i mehanička svojstva, bit će obrađena ovim radom. [1]

## 2. OPĆENITO O KOMPOZITIMA

Kompozitni materijali ili kompoziti proizvedeni su spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s jasnom granicom između njih. Posljedica je dobivanje materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe. Pritom se ne radi samo o poboljšanju preradbenih i uporabnih svojstava (npr. povećanju specifične čvrstoće i specifičnoga modula elastičnosti, toplinske postojanosti, otpornosti prema abraziji, puzanju, itd.), nego transportnih i skladišnih, uključujući konačno i cijenu. [3,4]

Prva upotreba kompozita datira još iz 3400. godine pr. n. e. kad su u Mezopotamiji nastale preteče današnjih šperploča. U drevnom Egiptu, 2000 godina pr. n. e. rabljen je lan u kombinaciji s gipsom za izradu ritualnih posmrtnih maski, a 1500 godina pr. n. e. miješanjem blata i slame stvarane su opeke za gradnju (slika 2.1). Nešto kasnije, oko 1200 pr. n. e. Mongoli su izradili kompozitni luk kao jedno od najubojitijih oružja do izuma baruta. Pri tome su rabili kombinaciju životinjskih kostiju, rogova, debla breze i bambusa te svilu i tetive životinja uložene u prirodnu borovu smolu (slika 2.2). [5]



Slika 2.1. Prvi kompoziti opeke u drevnom Egiptu [5]



Slika 2.2. Mongolski luk [5]

Iako su kroz povijest poznati brojni primjeri predmeta koje bi se danas moglo nazvati kompozitima, značajniji napredak u razvoju kompozita, posebno vlaknima ojačanih kompozita, dogodio se u 20. stoljeću. Upotreba kompozita u automobilskoj industriji započela je ranih 1930-ih godina kada je Henry Ford upotrijebio sojino ulje za proizvodnju fenolne smole u koju se uložilo prirodno vlakno i takav kompozitni materijal primijenio za karoseriju automobila (slika 2.3 a). Značajan korak u području kompozita za automobilsku industriju bio je automobil Chevrolet Corvette, proizveden 1953. čiji su dijelovi karoserije bili izrađeni od poliesterske matrice ojačane staklenim vlaknima. Početak upotrebe biljnih vlakana u automobilskoj industriji započinje 1950-ih u Istočnoj Njemačkoj kada se počeo proizvoditi Trabant (slika 2.3 b), kojem je karoserija bila napravljena od poliesterske matrice ojačane pamučnim vlaknima. [5]



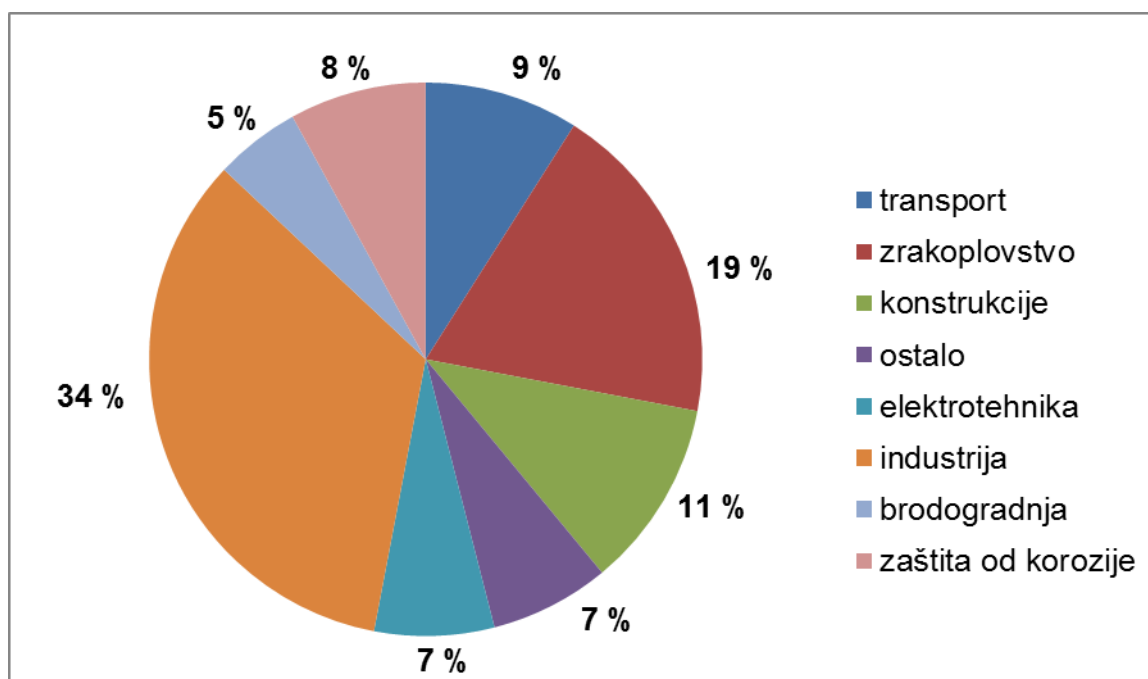
a)



b)

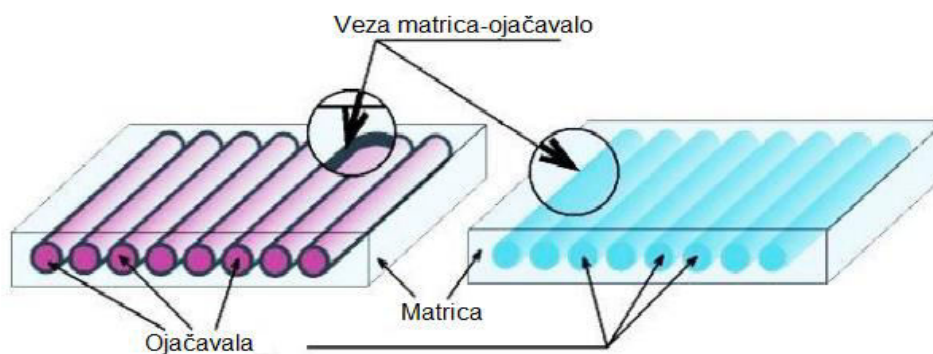
Slika 2.3. Kompoziti s prirodnim vlaknima u automobilskoj industriji: a) Automobil Henryja Forda, b) Trabant [6, 7]

Danas, u 21. stoljeću, zbog težnje za većim brzinama i manjom potrošnjom goriva, rijetki su dijelovi automobila koji nisu napravljeni od kompozitnih materijala. Naglasak u prvom redu se stavlja na iznimna svojstva, ali i na zaštitu okoliša te na mogućnost upotrebe biokompozita kao strukturnih materijala u automobilske industriji. [5] Da se upotreba kompozitnih materijala ne bazira samo na automobilske industriji vidi se na slici 2.4.



Slika 2.4. Svjetska godišnja potrošnja kompozitnih materijala [2]

Kompozitni materijali sastoje se od dva osnovna sastojka: matrice i ojačavala (slika 2.5)



Slika 2.5. Struktura kompozita [8]



## 2.1. Podjela kompozita

Podjela kompozita najčešća je s obzirom na : [4]

- materijal matrice
- oblik ojačavala.

Temeljem ove podjele pretpostavlja se da su osnova (matrica) kompozita: metali, keramika, odnosno polimeri, pa tako postoje razne vrste kompozita koji mogu biti spoj: metal-metal, metal-keramika, metal-polimer, keramika-polimer, polimer-polimer, polimer-metal. [4]

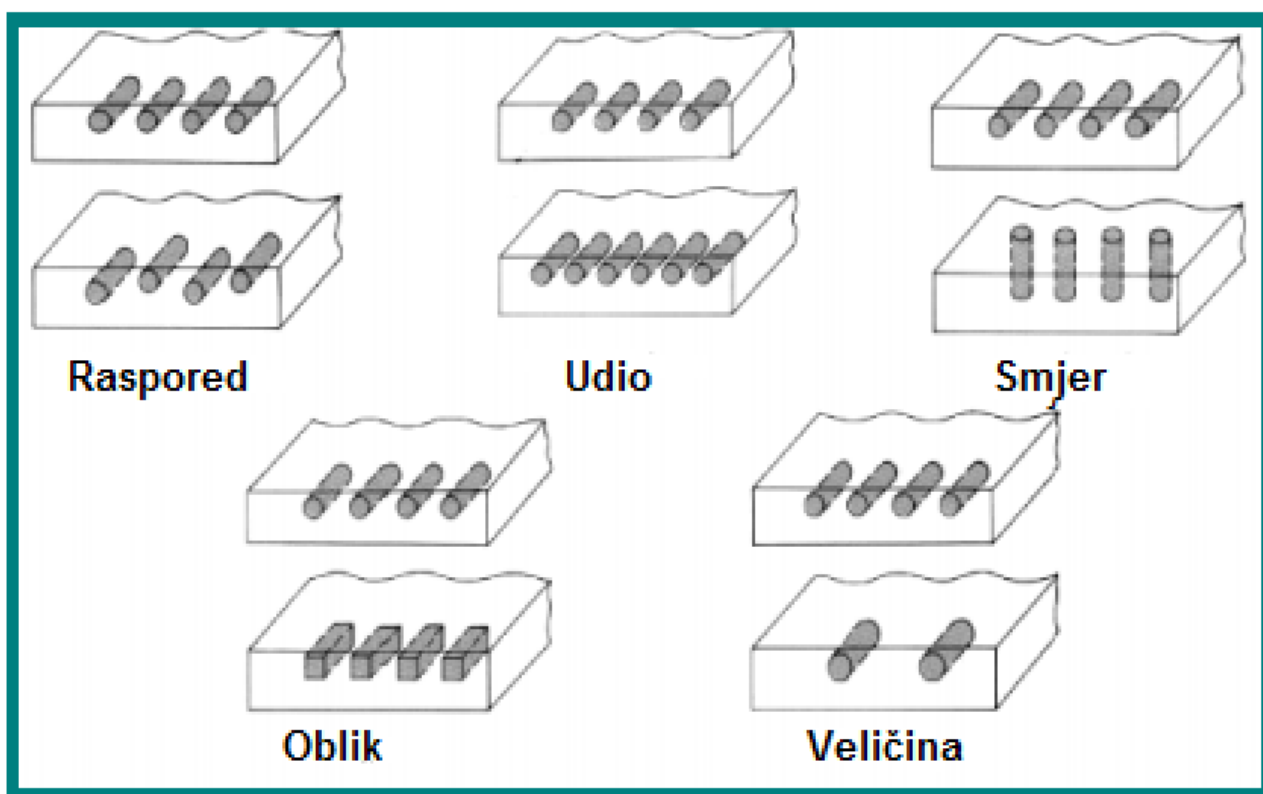
Podjela kompozita s obzirom na materijal matrice i ojačavala prikazana je slikom 2.6.



Slika 2.6. Podjela kompozita s obzirom na matricu i ojačavala [4]

Ukupno ponašanje kompozita ovisi o: [3]

- svojstvima matrice i ojačala
- veličini i rasporedu (raspodjeli) sastojaka prikazanima na slici 2.7.
- volumnom udjelu sastojaka
- obliku sastojaka
- prirodi i jakosti veze među sastojcima.



Slika 2.7. Ponašanje kompozita ovisno o sastojcima (raspored, udio, usmjerenost, oblik i veličina) [3]

## 2.2. Matrica kompozita

Uloga matrice u kompozitima je sljedeća: [3]

- povezuje vlakna
- prenosi opterećenje na vlakna
- zaštićuje vlakna od okolnih utjecaja i oštećenja
- daje postojanost na koroziju
- poboljšava svojstva u poprečnom smjeru
- poboljšava žilavost cijele konstrukcije
- ne smije kemijski reagirati s vlaknom
- mora prijanjati uz vlakna.

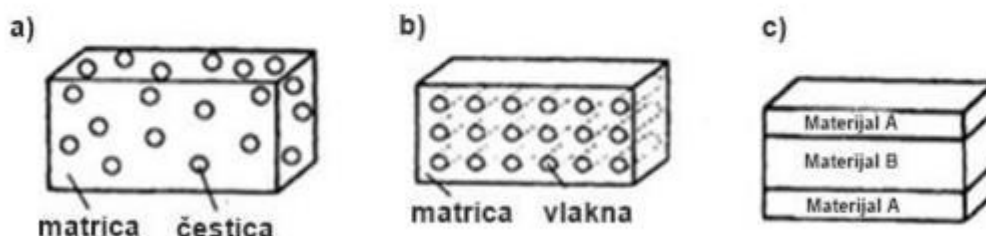
## 2.3. Ojačavala

Uloga ojačavala u kompozitima je sljedeća: [3]

- daju čvrstoću kompozitima
- visok modul elastičnosti
- krutost ostala zahtjevana svojstva (toplinska provodnost, otpornost na trošenje...).

Kompoziti prema obliku ojačavala mogu biti: (slika 2.8)

- kompoziti ojačani česticama
- kompoziti ojačani vlaknima
- strukturni kompoziti: slojeviti kompoziti (laminati), sendvičaste konstrukcije i stanični kompoziti. [4]



Slika 2.8. Podjela kompozita prema obliku ojačavala: a) kompozit ojačan česticama, b) kompozit ojačan vlaknima, c) strukturni kompoziti [9]

Na osnovu promjera i svojstava vlakna su svrstana u tri skupine: [3]

- viskeri
- vlakna
- žice.

Viskeri su sićušni monokristali koji imaju ekstremno veliki omjer duljine i promjera. Posljedica malih dimenzija je velik udio pravilnosti kristalne građe, pa gotovo nema mogućnosti tečenja što vodi do izuzetno visoke čvrstoće; oni su najčvršći poznati materijali. Pored svih nabrojenih svojstava ne primjenjuju se zbog visoke cijene. Vrlo ih je teško ugraditi u matricu. Viskeri mogu biti od grafita (ugljika), silicij-karbida, silicij-nitrida i aluminij-oksida. [3]

Vlakna mogu biti: polimerna i / ili keramička, kristalna ili amorfna, prirodna vlakna. [3]

Žice imaju relativno velik promjer, a upotrebljavaju se najčešće u automobilskim gumama i cijevima (čelik, Mo, W). [3]

---

**2.4. Prednosti i nedostatci kompozitnih materijala**

Prednosti kompozitnih materijala: [4]

- mogućnost izrade vrlo složenih oblika
- smanjenje troškova naknadne obrade dijelova
- mogućnost spajanja dijelova tijekom samog postupka proizvodnje
- dimenzijska stabilnost pri ekstremnim radnim uvjetima
- postojanost na koroziju.

Nedostaci kompozitnih materijala: [3]

- popravak kompozitnih proizvoda je kompliciraniji nego kod metala
- nije nužno da su kompoziti superiorniji metalima u svim svojstvima
- konstrukcijski problemi (spajanje kompozitnih dijelova, izrada provrta)
- interlaminarna naprezanja, nelinearno ponašanje materijala i sl.(npr. kontrola kod avio dijelova)

### **3. KOMPOZITI OJAČANI PRIRODNIM VLAKNIMA**

Upotreba prirodnih vlakana u vlaknima ojačanim kompozitima zbog njihove niže gustoće bitno snižava njihovu ukupnu masu u odnosu na vlaknima ojačane kompozite s umjetnim vlaknima, što u slučaju automobilske industrije znači manju potrošnju goriva, veću brzinu te niže investicijske troškove. Kao primjer mogu se navesti paneli za vrata, koji uz ista svojstva građeni od kompozita ojačanih biljnim vlaknima imaju masu od 5 kg, dok oni ojačani staklenim vlaknima masu od oko 9 kg [2]. Kompoziti ojačani biljnim vlaknima ne samo da pokazuju veću sigurnost prilikom sudara automobila jer nisu krti i ne lome se, već su zbog svojih mikro-morfoloških karakteristika dobri zvučni izolatori čime doprinose udobnosti putovanja. [5]

#### **3.1. Podjela prirodnih vlakana**

Prirodna vlakna mogu biti biljnog ili životinjskog podrijetla. Dok se vlakna životinjskog podrijetla dobivaju uglavnom iz vune i dlake, vlakna biljnog podrijetla se dobivaju iz raznovrsnih biljnih proizvoda kao što su lišće, stabljika, trava i sl. Prirodna vlakna biljnog podrijetla su češće dostupna i eksploatacijski prihvatljivija. Od široke palete biljaka koje su dostupne i prikladne za dobivanje vlakana neke su prikazane na slici 3.1. Zbog svojih svojstava i zanimljivosti u nastavku će detaljnije biti prikazani: bambus, banana, lan i konoplja. Njihova bioraznolikost te široka dostupnost i mogućnost jednostavnog uzgoja, te oporabljivost prirodnih vlakana predstavlja ih poželjnim materijalom budućnosti. [4]



Slika 3.1. Vrste prirodnih vlakana [4]

### 3.2. Prednosti i nedostatci prirodnih vlakana

Upotreba prirodnih vlakana nosi brojne prednosti, ali isto tako i niz nedostataka. Ovisno o konstrukcijskim zahtjevima izabire se optimalno rješenje uzimajući u obzir prednosti i nedostatke prirodnih vlakana.

Prednosti prirodnih vlakana: [4]

- obnovljivi izvor
- laka dostupnost
- niska cijena i mali udio utroška energije tijekom proizvodnje
- manja gustoća osigurava visoku specifičnu čvrstoću i krutost u usporedbi sa staklenim vlaknima
- sigurnija za rukovanje i proizvodnju u odnosu prema sintetskim vlaknima
- ušteda zbog manjeg trošenja opreme jer su prirodna vlakna neabrazivna u odnosu prema sintetskim vlaknima
- visoka električna provodnost i dobra zvučna izolacija.

---

Nedostatci prirodnih vlakana: [4]

- teško raspršljivi u matrici
- prirodna vlakna su higroskopna - upijaju vlagu, što ima za posljedicu stvaranje pora, slabljenje veza, a time i lošijih mehaničkih svojstava kompozita
- vlakna počinju degradirati u rasponu od 90 do 200 °C, pa su temperatura prerade i izbor materijala matrice ograničeni
- osjetljiva su na truljenje / degradaciju iz okruženja (mikroorganizmi, gljivice, itd.)
- dimenzije vlakana i mehanička svojstva variraju od biljke do biljke
- sadnja biljaka za izradu ojačavala smanjuje zemljišta za sadnju prehrambenih sorti.

### 3.3. Zamjena sintetskih vlakana

Prvi predstavnici kompozita bili su polimerni kompoziti, točnije polimerni kompoziti ojačani sintetskim vlaknima koji su se početno rabili za manje opterećene dijelove zrakoplova. Polimerni kompoziti načinjeni su od polimerne smole kao matrice i ojačavala, uglavnom u obliku vlakana. Tipično sadrže čvrsta, kruta i krhka vlakna u mekanijoj, duktilnoj i žilavoj polimernoj smoli. Vrlo česti kompoziti staklenog i ugljičnog ojačanja sadrže kruta i čvrsta, ali i krhka vlakna ugrađena u polimernu matricu, koja sama po sebi nije osobito ni kruta niti čvrsta. Vlakna mogu biti kristalasta ili amorfna te imaju mali promjer. Vlakna nose opterećenje, te zbog visoke čvrstoće mogu zaustaviti širenje pukotine i u mikropodručju. [10]

Zbog sve veće usmjerenosti prema zaštiti okoliša, ali i sve rigoroznijih zakona i direktiva na području zaštite okoliša, upotreba biljnih vlakana, kao zamjena za sintetska vlakna, može se smatrati ekološki povoljnijim rješenjem jer sama proizvodnja biljnih vlakana zahtijeva manju potrošnju energije i to za oko 4 puta u usporedbi s proizvodnjom iste mase staklenih vlakana. Sada su već donesene razne direktive prema kojima se utvrđuju mjere koje prvenstveno imaju za cilj sprečavanje stvaranja otpada, ponovnu uporabu, recikliranje i ostale oblike uporabe otpadnih materijala i njihovih komponenti kako bi se smanjilo zbrinjavanje otpada, kao i unapređenje djelovanja na okoliš svih gospodarskih subjekata koji se bave



proizvodnjom. [5] Svakako je jedan od ciljeva današnjice povećati upotrebu oporabljivih sirovina u novim proizvodima. Zamjenom kompozita ojačanih staklenim vlaknima s kompozitima ojačanim prirodnim biljnim vlaknima ublažio bi se njihov negativan utjecaj na okoliš. Naime, biljna su vlakna biorazgradljiva i lakše ih je oporabiti nakon uporabe, a lako su dobavljiva jer su poljoprivredni proizvod. Stoga primjena biljnih vlakana u kompozitima za automobilsku industriju naglo raste, do 20 % godišnje. Automobilska industrija svakako prednjači, te je ona zapravo u najvećoj mjeri zaslužna za istraživanja na primjeni prirodnih vlakana u polimernim kompozitima. Podatci stečeni primjenom prirodnih vlakana djeluju ohrabrujuće za njihovu primjenu i u drugim industrijama. Naročito se vidi porast primjene u industriji sportske opreme, građevine te općenito plastičarske proizvodnje. [5]

## 4. PRIRODNA VLAKNA

Općenito se može prihvatiti činjenica da se oživljava trend sve veće upotrebe prirodnih vlakana u svim područjima industrije, u odnosu na prethodno razdoblje u kojem je zbog velikog zamaha proizvodnje umjetnih vlakana, upotreba prirodnih bila prilično potisnuta. U skladu s time, primjena prirodnih vlakana postaje nezaobilazna i u području vlaknima ojačanih kompozita. Za tu svrhu najčešće se upotrebljavaju celulozna vlakna koja sadrže lignin, tj. lignocelulozna vlakna, koja zbog dobrih mehaničkih svojstava, obnovljivosti sirovine i biorazgradljivosti, postaju sve zanimljivija za primjenu u proizvodnji polimernih kompozita. [5]

### 4.1. Bambus

U botaničkom svijetu ima 1575 različitih vrsta bambusa. Svaka pojedina vrsta bambusa ima različita svojstva i kvalitetu. Bambus je lako dostupan na globalnoj razini, 64 % se uzgaja na plantažama (slika 4.1) u jugoistočnoj Aziji, 33 % se uzgaja u Južnoj Americi, a ostatak dolazi iz Afrike i zemalja Oceanije. Uporaba bambusa kao sirovine u gradnji datira unatrag nekoliko tisuća godina. Bambus ima niz prednosti i često se primjenjuje kao materijali za konstrukcije ili se rabi kao sirovina za proizvodnju papira. [11]



Slika 4.1. Plantaža bambusa u Kini [11]

Bambus slovi kao veliki potencijal koji će se upotrebljavati kao čvrsti zamjenski materijal, osobito u proizvodnji, projektiranju i uporabi konstrukcija koje zahtijevaju malu masu i visoku čvrstoću. Bambusova svojstva, prije svega mala masa i visoka čvrstoća privukla je brojne znanstvenike da istraže mogućnosti ove biljke, a posebno u području biokompozita. Proizvodnja kompozita od bambusa priznata je kao jedna od zelenih tehnologija koja u potpunosti odgovara eko-proizvodu prihvatljivom za okoliš [6]. Poljoprivrednu biomasu dobivenu od bambusa mnogi istraživači su identificirali kao najveći izvor prirodnih vlakana i celuloznih vlakana prikladnih za biokompozite. Bambus je prepoznat kao izvor vlakana koja se mogu obrađivati i oblikovati u široku paletu proizvoda. Vlakna bambusa daju novu dimenziju posebno u pogledu njegove raznolikosti u proizvodnji kompozitnih proizvoda. [11]

Osim poboljšanja kvalitete okoliša, kroz razvoj održivog proizvodnog lanca teži se i smanjenju emisije štetnih stakleničkih plinova. U prošlosti pitanje okoliša nije bilo jedno od ključnih pitanja, ali je danas uzbudljiv izazov koji može dovesti do novih rješenja i dokazati mudar ekonomski izbor. Na tragu tih rješenja nalazi se i upotreba prirodnih vlakana bambusa u polimernim kompozitima. Da bi se težnja za očuvanjem okoliša nastavila potrebno je ulagati u održivu proizvodnju. Da bi proizvod bio održiv u njegov razvoj je potrebno uključiti tri elementa koji će ga sinergijski razvijati, a to su: ekologija, ekonomija i tehnologija kao što je prikazano na slici 4.2. [11]



Slika 4.2. Tri ključna elementa u stvaranju održivog proizvoda [11]

Da bambus doprinosi očuvanju ekosustava pokazuju svojstva same biljke. Bambus ima korijenje koje se širi pod zemljom u svim smjerovima. Zemljište se povezuje korijenjem i štiti od klizišta za vrijeme jakih kiša i potresa. S druge strane ekonomska trgovina vođena prihodima ostvarenim od proizvoda često ne dozvoljava ulaganje u zelenu tehnologiju. To je jedan od glavnih razloga zašto je nastao ozbiljni problem odlaganja otpada i poremećaj okoliša. [11]

#### **4.1.1. Kompoziti s bambusovim vlaknima**

Dugoročni globalni utjecaj proizvodnje namještaja potaknuo je znanstvenike da pronađu rješenja raznih problema putem istraživanja i razvoja novih materijala, a ta istraživanja dovela su do uporabe bambusa kao temelja biokompozitnih materijala. Industrija biokompozita i kompozita temeljena na uporabi bambusa ima važnu ulogu u poboljšanju kvalitete proizvoda i same proizvodnje kompozitnih materijala. Primjeri nekih biokompozitnih materijala koji su dokazali svoju kvalitetu u primjeni su: bambusove ploče male mase, iverice i bambus furnir koji se naširoko koristi u proizvodnji namještaja i drugih proizvoda. Osobita svojstva kompozita s bambusovim vlaknima su rastezna čvrstoća na vlak, duktilnost i veća otpornost na pucanje, veća čvrstoća materijala i žilavost od ostalih kompozita. Sva ta svojstva ne posjeduju druge vrste prirodnih vlakana. [11]

Bambusova vlakna primjenjuju se u polipropilenskoj matrici s ciljem da se proizvede osobito lagan kompozit. Mala masa takvih kompozita prikladna je za primjenu u proizvodnji ploča za pokrivanje krovova prikazanih slikom 4.4 i profila za građevinsku industriju (slika 4.3) gdje je smanjenje mase jedan od glavnih konstrukcijskih zahtjeva. [11]

Kompozit napravljen od bambusovih vlakana kao ojačavala i polipropilenske matrice ima niz prednosti uključujući visoku savojnu čvrstoću, visoka akustična svojstva i dobro prigušenje zvuka. Sve to čini bambus prikladnim materijalom da se njime zamijene staklena vlakna u proizvodnji kompozitnih materijala. Trenutno se primjenjuje najviše u autoindustriji i građevinarstvu. [11]



Slika 4.3. Profil za građevinsku industriju izrađen od kompozita s bambusovim vlaknima [11]



Slika 4.4. Ploča za pokrivanje krovova izrađena od kompozita s bambusovim vlaknima [11]

Istraživanjem svojstava vlakana bambusa i njegove kombinacije s drugim vlaknima došlo se do zanimljivog efekta. Spojem ugljikovih i bambusovih vlakana koja se u kombinaciji primjenjuju kod polimernih kompozita dobiva se zanimljivo svojstvo nastalog materijala. Polimerni kompozit s bambusovim i ugljikovim vlaknima ima vrlo velik broj pora u svojoj strukturi što ga čini izvrsnim za sprječavanje statičkog nakupljanja električne energije i apsorpciju hlapljivih kemikalija. [11]

U jednom od istraživanja kompozit ojačan prirodnim vlaknima bambusa pokazao se kao zanimljiv materijal koji će se primjenjivati u morskim uvjetima. Trup čamca nakon što je proizveden od kompozita ojačanog vlaknima bambusa podvrgnuo se mehaničkim ispitivanjima. Slika 4.5 prikazuje ispitivanje materijala kroz nekoliko faza. Ispitivanja su pokazala odlična mehanička svojstva, uključujući starenje materijala i postojanost prema morskim atmosferskim uvjetima. [11]

Eksploatacija bambusa i proizvodnja kompozita još se primjenjuje u proizvodnji dasaka za surfanje, koje postaju sve omiljenije kod natjecatelja. [11]

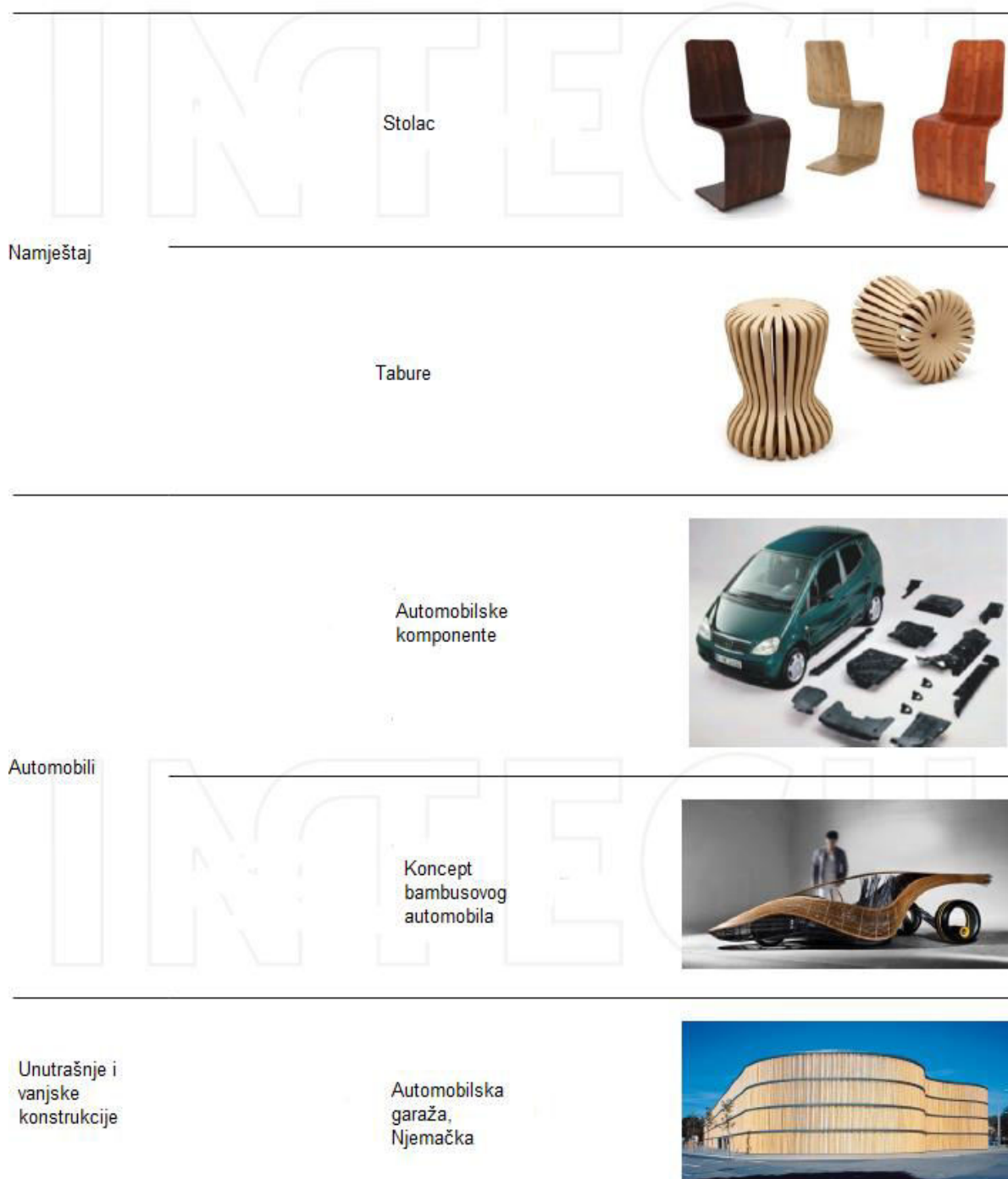


Slika 4.5. Proces ispitivanja trupa broda od kompozita s bambusovim vlaknima namijenjen za vodene sportske aktivnosti [11]



#### 4.1.2. Primjena kompozita ojačanih bambusovim vlaknima

Bambus ima široku primjenu u proizvodnji kompozita (slika 4.6), gdje se kompoziti izrađeni bambusovim vlaknima upotrebljavaju za proizvodnju namještaja, dijelova automobila te u građevinarstvu.



Slika 4.6. Primjena kompozita ojačanog bambusovim vlaknima u raznim područjima primjene [11]



## 4.2. Banana

Banana je jedna od najstarijih kultiviranih biljaka u svijetu. Samo biljka banane ima oko 300 vrsta, no samo 20 vrsta se primjenjuje u proizvodnji. Oko 70 milijuna tona banane se proizvode svake godine u tropskim i suptropskim krajevima svijeta.

Najveći dio se proizvodi na plantažama, a jedna takva je prikazana na slici 4.7. Stoga kao rasprostranjena biljka predstavlja izvrstan izvor prirodnih vlakana koja će se i razmatrati u vidu proizvodnje polimernih kompozita. [12]



Slika 4.7. Plantaža banana [13]

#### 4.2.1. Struktura vlakana banane

Stablo banane posjeduje oko 30 velikih listova koji su u prosjeku dugi 2,7 m i široki 30 do 60 cm. Takva struktura je odraz visoke prisutnosti celuloze čije vrijednosti se mogu vidjeti u tablici 4.1. U usporedbi s vlaknima šećerne trske i kokosa banana posjeduje u prosjeku 10 % više celuloze. Dimenzije poprečnog presjeka vlakana mjere se u različitim stupnjevima orijentacije i u prosjeku iznose 0,3596 mm<sup>2</sup>. [12]

Tablica 4.1 Kemijska svojstva prirodnih vlakana [12]

Vlakna	Lignin, %	Celuloza, %	Hemiceluloza, %
Banana	9	43,46	38,54
Kokos	59,40	32,65	7,95
Šećerna trska	13,00	30,27	56,73

Tablica 4.2 prikazuje postotak vlage i gustoću vlakana te se iz nje može zaključiti kako vlakna banane imaju visoku gustoću koja je čak 30 % veća u odnosu na bambus, a količina vlage je ispod prosjeka gledajući u odnosu na biljke prikazane u tablici. [12] Upravo je manji postotak količine vlage jedna od prednosti vlakana banane imajući u vidu da povećana količina vlage utječe negativno na karakteristike polimernog kompozita .

Tablica 4.2 Postotak vlage i gustoća prirodnih vlakana [12]

Vlakna	Udio vlage, %	Gustoća, kg/m <sup>3</sup>
Bambus	10,1	940
Palma	12,08	1 030
Kokos	11,36	1 150
Banana	10,71	1 350
Sisal	9,76	1 450

#### 4.2.2. Mehanička svojstva vlakana banane

Ispitujući potencijal vlakana banane izveden je niz istraživanja mehaničkih svojstava kao što su rastezna čvrstoća, savojna čvrstoća samih vlakana te polimernih kompozita ojačanih prirodnim vlaknima banane. Svi rezultati pokazuju odlična mehanička svojstva koja posjeduju vlakna banane. [12]

Uspoređujući rasteznu čvrstoću bananinih vlakana čije su vrijednosti prikazane u tablici 4.3 a koja se nalazi u području od 529 do 759 MPa i modula rasteznosti koji se nalazi u rasponu od 8 do 20 GPa čini ova vlakna prikladnim za njihovu primjenu u polimernim kompozitima koji zahtijevaju visoku rasteznu čvrstoću. Jedina biljka koja bitnije ne odstupa po vrijednostima rastezne čvrstoće je bambus koji je u prethodnoj točki i spomenut. Banana ima manji modul rasteznosti od bambusa, ali veću rasteznu čvrstoću. Postotak produljenja vlakana kreće se između 1,0 % i 3,5 %. Promjer vlakana banane nalazi se u rasponu između 0,08 mm i 0,25 mm. [12]

Tablica 4.3. Mehanička svojstva različitih prirodnih vlakana [12]

Vlakna	Rastezna čvrstoća MPa	Rastezni modul GPa	Specifična rastezna čvrstoća MPa / kg/m <sup>3</sup>	Specifični rastezni modul MPa / kg/m <sup>3</sup>
Bambus	503	35,91	0,553	39,5
Palma	377	2,75	0,366	2,67
Kokos	50	2,5	0,4348	2,17
Banana	600	17,85	0,4414	13,22
Sisal	567	10,4	0,391	7,17

#### **4.2.3 Primjena vlakana banane u polimernim kompozitima**

Polimerni kompoziti s vlaknima banane najviše se koriste u autoindustriji, ali isto tako u graditeljstvu kao pokrovni materijal, što je prikazano na slikama 4.8 i 4.9.



Slika 4.8. Podmetači od vlakana banane u Ford Lincolnu [14]



Slika 4.9. Pokrovni materijal od vlakana banane [15]



### 4.3. Lan

Lan je biljka koja se najčešće rabi za dobivanje prirodnih vlakana. Lan je također jedna od prvih biljaka koja se počela primjenjivati još od samih početaka civilizacije. Lan, korišten kao tekstilni materijal, pronađen je u grobnicama u Egiptu koje datiraju iz 5000 godine pr.n.e. U nedavnim istraživanjima u Gruziji pronađena su upletena lanena vlakana što ukazuje da su prapovijesni lovci sakupljači rabili lan u izradi oruđa, tkanju košara ili šivanju odjevnih predmeta prije 30000 godina. Danas se lan uzgaja za eksploataciju prirodnih vlakana i sjemena lana za proizvodnju visokokvalitetnog ulja. Kanada je najveći proizvođač i izvoznik lana u svijetu od 1994. godine. U 2005. / 2006., u Kanadi je proizvedeno oko 1,035 milijuna tona, a trenutno isporučuje 60 % svojih lanenih proizvoda izvozom u Europsku uniju, 30 % u SAD-e, a 4 % u Japan. Ostali vodeći proizvođači lana su Francuska, Belgija i Nizozemska, s gotovo 130 000 jutara godišnje. U 2007. godini u Europskoj uniji proizvedeno je 122 000 tona lanenih vlakana. Lan je važan usjev i na našim prostorima, a jedan takav možemo vidjeti na slici 4.10. [16]



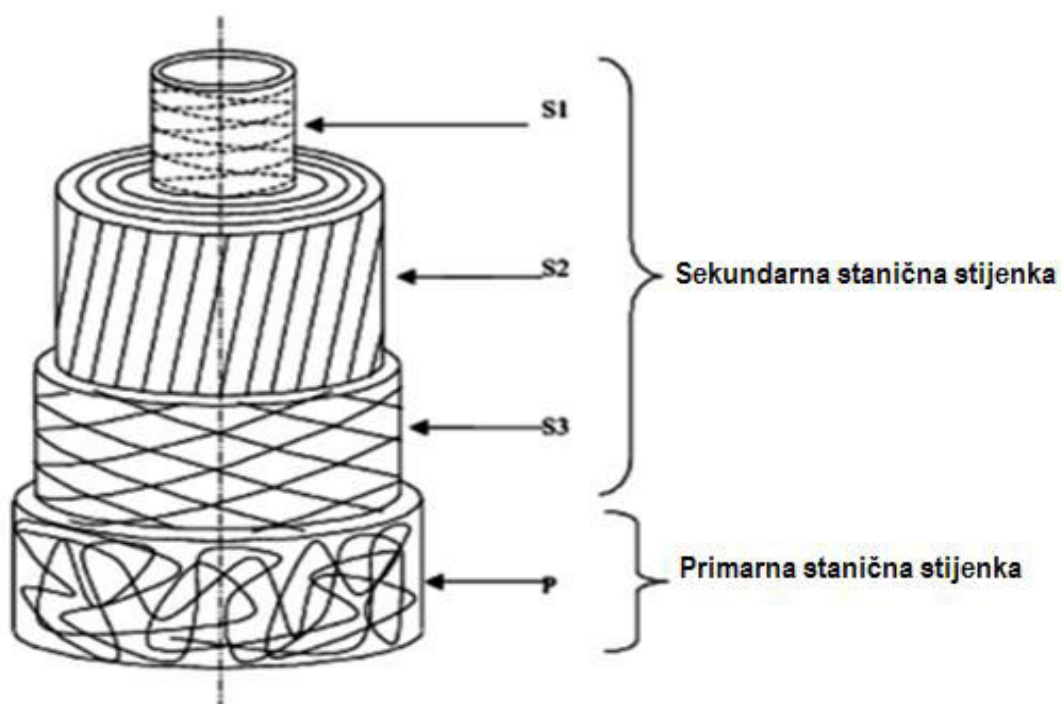
Slika 4.10. Polje lana na našim prostorima [17]

Danas je proizvodnja i preradba lana u svijetu visoko mehanizirana i industrijalizirana i u njoj se rabe svi dijelovi biljke. Vlakno se dobiva iz stabljika koje se čupaju u tzv. žuto-zelenoj zrelosti. Čupanje se obavlja specijaliziranim strojevima – čupačima, koji istodobno odvajaju tobolce od stabljike. Vlakanca se izdvajaju iz lika, kore stabljike, maceracijom (močenjem) u vodi i mehaničkom obradom. U suvremenom postupku preradbe lana, maceracija se obavlja u bazenima s toplom vodom u koje se dodaju enzimi. Nakon močenja, ispiranja i sušenja drvenasti dijelovi se izlome na rebrastim valjcima, a potom se od vlakna odvoje izlomljene čestice. Proizvod koji tako nastaje naziva se povjesmo. Grebenanjem povjesma otpadne kučina, koja se sastoji od kratkih, međusobno isprepletenih vlakana i drvenastih čestica. Kratko vlakno (kučina) rabi se za izradu konopa, za pakiranje, brtvljenje te u građevinarstvu. Od kratko rezanih prirodnih vlakana odvojenih od drvenastih dijelova stabljike proizvode se role ili ploče za izolaciju krovova, potkrovlja i pregradnih zidova montažnih kuća. Lanena se vlakna upotrebljavaju i u automobilske industriji najčešće u vidu kompozitnih materijala. [16] Lanena vlakna se u građevinarstvu upotrebljavaju samo 1 % od ukupne proizvodnje, a najviše u tekstilnoj industriji gotovo 83 %. Na upotrebu vlakana za proizvodnju kompozita otpada 6 %, ali zbog svojih svojstava, koja će u nastavku biti spomenuta, i ekološke prihvatljivosti taj će postotak narednih godina zasigurno rasti. [18]

#### 4.3.1. Struktura vlakana lana

Lanena vlakna dobivaju se iz stabljike biljke. Stabljika lana kreće se do duljine od 90 cm i posjeduje vlakna duž cijele stabljike, s prosječnim promjerom od 12 do 16  $\mu\text{m}$ . [19]

Većina vlakana uglavnom se nalazi u sloju S2 u sekundarnoj staničnoj stijenci koja dominira presjekom, kao što je prikazano na slici 4.11. Ovaj najdeblji dio stanične stijenke (S2) sadrži brojna celulozna mikrovlakna koja daju vlakna visoke vrastezne čvrstoće. [19]



Slika 4.11. Struktura lanenog vlakna [19]

#### **4.3.2. Kompoziti ojačani prirodnim vlaknima lana**

Vlakna lana su elastična, ali samo za mala istezanja. Do raspadanja vlakana dolazi pri temperaturama iznad 200 °C. Lanena vlakna su postojana u razrijeđenim slabim kiselinama te lužnatim otopinama, a na suncu postupno gube čvrstoću. Lanena su vlakna skupa zbog puno koraka u proizvodnji koji zahtijevaju ljudski rad. Primjenjuju se kao ojačavala u kompozitima koji se rabe tamo gdje je potrebno podnijeti malo do srednje opterećenje. Posebno su prikladna za izradu dijelova unutrašnjosti automobila, npr. zamjenjuju staklena vlakna u kompozitima od kojih su građeni unutrašnji paneli vrata, pregradne police, nasloni sjedala, pokrov rezervne gume te ostale unutrašnje presvlake. U posljednje vrijeme autoindustrija ulaže velike količine novca u istraživanja vezana za primjenu kompozita na bazi lanenih vlakana u eksterijerima automobila. Dva su glavna postupka proizvodnje takvih kompozita. Prvi se sastoji od miješanja vlakana s polietilenom ili polipropilenom te se formira prepreg koji se koristi u više različitih slojeva. Alternativno se netkani mat okruži raspršenim polipropilenskim vlaknima te polipropilen povezuje slojeve netkanog materijala nakon prešanja u vrućoj preši. Drugi se postupak temelji na upotrebi duromernih matrica koje zagrijavanjem omekšaju, upiju se u preprege te se prešaju i hlade da bi se dobio gotovi proizvod. Rabe se epoksidne i poliuretanske matrice. [20]

Istraživanja su pokazala da upotrebom epoksidne matrice i lana kao ojačavala dobiva se kompozit veće krutosti čija se vrijednost kreće oko 40 GPa i rastezne čvrstoće oko 280 MPa. Visoka rastezna čvrstoća prirodnih vlakana lana čije su vrijednosti prikazane u tablici 4.4. doprinosi povećanju rastezne čvrstoće kompozita povećavanjem volumnog udjela vlakana. Opaženo je da se vlačna čvrstoća i modul rasteznosti povećavaju s povećanjem volumnog udjela vlakana ( 0 %, 10 %, 18 %, 20 % i 30 %). Charpyev test pokazao je da bi se uporabom vlakana lana značajno povećala udarna žilavost kompozita. [19]



Tablica 4.4. Pregled svojstava vlakana lana [20]

Vlakno	Vrsta vlakna	Gustoća, g/cm <sup>3</sup>	Prekidna čvrstoća, MPa	Modul rasteznosti, GPa	Specifična čvrstoća, MPa / g/cm <sup>3</sup>	Prekidno istezanje, %	Apsorpcija vlage, %
Stakleno vlakno	mineral	2,50 - 2,55	1 800 - 3500	70,0 - 73,0	700 - 1400	2,5 - 3,0	0,0
Lan	liko	1,40 - 1,50	345 - 1500	27,6 - 80,0	230 - 1070	1,2 - 3,2	7,0
Konoplja	liko	1,48	550 - 900	70,00	370 - 610	1,60	8,0
Juta	liko	1,30 - 1,45	400 - 800	10,0 - 30,0	280 - 610	1,16 - 1,8	12,0
Agava	list	1,33 - 1,45	468 - 700	9,4 - 38,0	320 - 530	2,0 - 7,0	11,0
Curaua	list	1,40	500 - 1150	11,8	360 - 820	3,7 - 4,3	/

Jedan od glavnih prepreka koje treba svladati za uspješnu komercijalizaciju kompozita ojačanih prirodnim vlaknima je njihova trajnost. Trajnost se odnosi na otpornost i oštećenja koji proizlaze iz vanjskih i unutarnjih utjecaja. Nedostatak podataka koji se odnose na trajnost kompozita ojačanih prirodnim vlaknima jedan je od glavnih izazova koje treba riješiti prije no što se u širokoj mjeri prihvati njihovo korištenje u različitim inženjerskim područjima. Gledajući biokompozite, njihov životni ciklus treba prilagoditi specifičnim zahtjevima. U usporedbi sa staklenim vlaknima ojačanim kompozitima, kompoziti ojačani prirodnim vlaknima lana imaju relativno slabu postojanost na vlagu. Lanena vlakna karakterizira velik unos vlage što dovodi do slabih međufaznih veza između vlakana i matrice i na taj način se postižu slabija mehanička svojstva kompozita. Lanenim vlaknima ojačani kompoziti su vrlo osjetljivi na utjecaje iz okoliša, kao što su atmosferski uvjeti i toplinska starenja što im smanjuje uporabni vijek. Uklanjanje i umanjivanje utjecaja vlage na mehanička svojstva kompozita s prirodnim vlaknima su od ključne važnosti za primjenu takvih kompozita na otvorenim površinama. Različiti vremenski uvjeti također mogu izazvati promjenu boje, gubitak mase, površinske hrapavosti i sniženje mehaničkih svojstava kompozita. Stoga, uporabom hibridnih kompozita koji sadrži dvije ili više vrsta različitih vlakana će prednosti jedne vrste vlakana nadomjestiti nedostatke druge vrste vlakana. Kao posljedica toga, ravnotežu u performansama, trajnosti i cijeni mogli bi postići hibridni kompozitni materijali s prirodnim vlaknima. [19]

#### **4.3.3. Primjena vlakana lana u kompozitima**

Vlakno lana je prirodni materijal i u kompozitima utječe na smanjenje mase, povećanje čvrstoće i bolje prigušenje vibracija uzrokovanih neravnim površinama. Takva svojstva materijala rezultiraju maksimalnim učinkom i ekstremnim užicima u snježnim i vodenim sportovima. [21]

Kompoziti s vlaknima lana imaju veliki potencijal da se počnu uvelike primjenjivati u vrhunskom sportu kao na slici 4.12. Ispitivanja su pokazala da su karakteristike proizvoda za sportske aktivnosti na snijegu znatno poboljšane uporabom lanenog vlakna. [21]

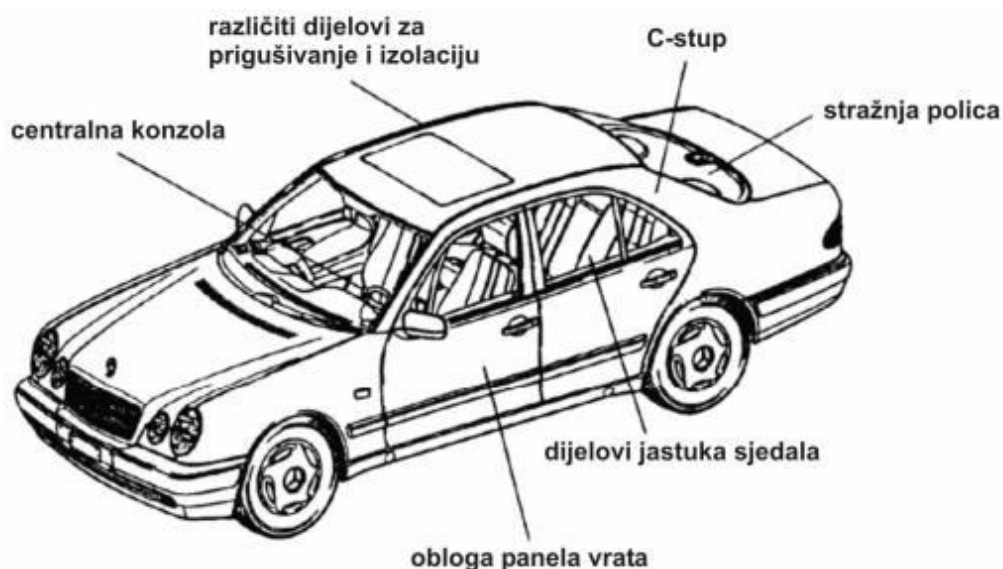


Slika 4.12. Primjena lana u zimskim sportovima [21]

Prednosti skija i snowboarda obogaćenih prirodnim vlaknima lana: [21]

- stalno i stabilno klizanje po snijegu
- povećana prigušenja na tvrdom i neravnom terenu
- mekani ulazak u prijelazu i ubrzanja na prijelazu
- veća stabilnost i ravnoteža na većim nagibima.

Lanena vlakna kao ojačalo u biokompozitima rabljena su već tijekom Drugog svjetskog rata u izgradnji aviona tipa Spitfire. Danas takvi biokompoziti nalaze široku primjenu na području automobilske, avio i građevinske industrije. Mnogi proizvođači automobila (npr. Mercedes-Benz; slika 4.13) ugrađuju biokompozite s lanenim vlaknima u svoje automobile. Ovi kompoziti posebno su prikladni za izradu unutarnjih dijelova automobila, npr. zamjenjuju staklena vlakna u kompozitima od kojih su izgrađeni unutarnji paneli vrata, pregradne police, nasloni sjedala, pokrov rezervne gume te ostale unutarnje presvlake. [5]



Slika 4.13. Upotreba lanenih vlakana u proizvodnji dijelova za automobil Mercedes-Benz E-Class [5]

#### 4.4. Industrijska konoplja

Konoplja (*Cannabis sativa*) naziva se i industrijska konoplja te je biljka iz obitelji Cannabaceae koja se uzgaja za vlakno ili za jestive sjemenke. [22] Industrijska konoplja sveopće je prihvaćen termin za kontrolirano uzgajanje sorti konoplje *Cannabis sativa*. Ono čega mnogi nisu svjesni je to da ova biljka nije isto što i njezina psihoaktivna sestra, marihuana (*Marijuana*). Industrijska konoplja sadrži manje od 0,5 % THC-a (tetrahidrokanabinola), psihoaktivne supstance koju sadrži marihuana. Prema tome industrijsku konoplju nije moguće upotrebljavati kao opojnu drogu. Čak sadrži i supstancu zvanu CBD (*kanabidiol*) koja blokira i isključuje tu mogućnost. [23] Konoplja potječe iz središnje Azije. Uzgoj konoplje za proizvodnju vlakana zabilježen je u Kini već 2800 godina pr.n.e. i korišten je u mediteranskim zemljama Europe početkom kršćanske ere, te se zatim širi po ostatku Europe tijekom srednjeg vijeka. Zasađena je u Čileu u 16. stoljeću, a stoljeće kasnije u Sjevernoj Americi [23]. Ova vrsta usjeva (slika 4.14) nekada je bila stup američke ekonomije, ali je 1930-ih industrijska konoplja proglašena ilegalnom. [23]



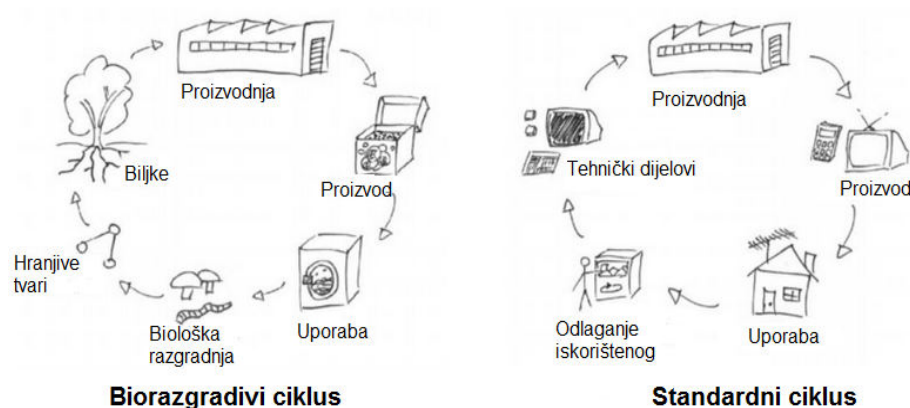
Slika 4.14. Industrijska konoplja [24]

Sve do 19. stoljeća konoplja je bila nezamjenjiva sirovina u proizvodnji tkanina, u pomorstvu, u proizvodnji hrane, u građevinarstvu, u proizvodnji papira. Prva Biblija, zemljopisne i pomorske karte, prvi nacrt američke deklaracije o nezavisnosti i Ustav Sjedinjenih Američkih Država bili su na papiru od konoplje. Punih 150 godina britanska enciklopedija tiskala se na papiru od konoplje. Slike Rembrandta, Thomasa Gainsborougha, Van Gogha kao i mnogih drugih slikara bile su slikane najčešće na konopljinom platnu. Od konoplje se proizvode brojni korisni proizvodi. Konopljino sjeme je vrlo zdravo za ljudsku ishranu. Od konoplje se proizvodi gorivo, koje je u prošlosti rabljeno za lampe, a danas se rabi kao alternativno gorivo naftnim derivatima (tzv. biodizel). Prešane stabljike konoplje koriste se kao građevinski materijal. Zidovi od konoplje trajniji su od betonskih, a ujedno lakši i elastičniji, otporni na pucanje, razbijanje i vatru, odličan zvučni i toplinski izolator [25]

Konoplja se i dalje obilno uzgaja u svijetu i njezina vlakna su jedna od najizdržljivijih prirodnih vlakana poznatih čovjeku. Vlakno ima primjenu u mnogim industrijskim granama uključujući tekstilnu, papirnu, prehrambenu i industriju proizvodnje bioplastike. [23]

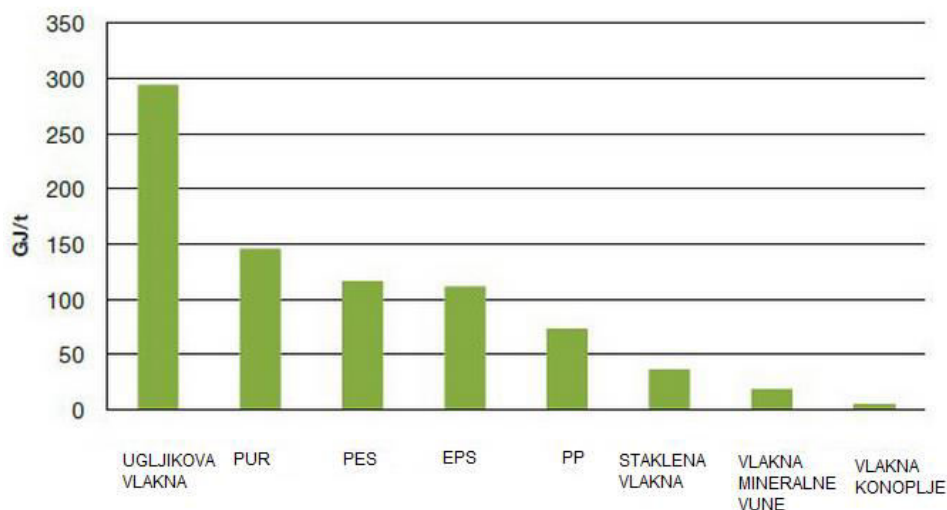
Kada bi se od industrijske konoplje izrađivali polimerni kompoziti, takva plastika bi bila prikladnija za uporabu. Upravo ovdje leži najveći potencijal ovog materijala. Obično se postupak uporabe promatra kao ponovna upotreba ili davanje novih oblika mehaničkim dijelovima, dok se upotrebom materijala koji su potpuno biorazgradivi mogao uspostaviti potpuno novi životni ciklus proizvoda prikazan na slici 4.15 koji je mnogo više naklonjen očuvanju životne sredine. [22]

Ciklus započinje kada se biljka konoplje požanje i raščlani na komponente (sirovine) neophodne za proizvodni proces. Kao rezultat procesa, dobivamo proizvod. Nakon uporabnog vijeka, proizvod se odnosi na deponij gdje priroda sama čini svoje. Proizvod je razložen na nutrijente kao hranjive tvari neophodne za rast biljaka, i time je ciklus zatvoren. Biokompozit od konoplje predstavlja održivu alternativu u uporabi konvencionalnih polimera. [22]



Slika 4.15. Biorazgradljivi ciklus i standardni ciklus [22]

Konoplja je poznata po svojoj sposobnosti da apsorbira ugljikov dioksid ( $\text{CO}_2$ ), kojeg apsorbira i do četiri puta tijekom razdoblja rasta koji traje od 12 do 14 tjedana, nego prosječno drvo za isto razdoblje. Energija neophodna za uzgajanje i obradu konoplje u usporedbi sa sličnim materijalima prikazana je na slici 4.16. [22]



Slika 4.16. Utrošak enegije za uzgoj i obradu konoplje izražen u gigadžulima po toni – GJ/t [22]

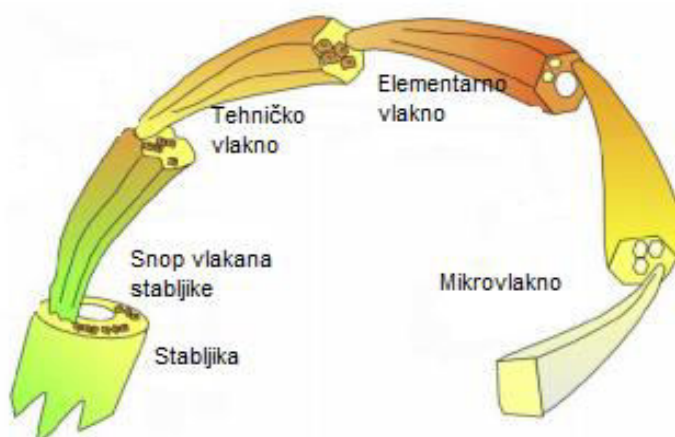
Također izuzetno obnavlja zemljište. Uzgajivači će je koristiti kao odličnu kulturu za obnavljanje zemljišta i dopunu mineralima koje su apsorbirale druge kulture usjeva

tijekom sezonskog ciklusa. [31] Jedini problem s kojim se ovdje susrećemo je činjenica da je upotreba stabljike u RH još uvijek ilegalna, dok je uzgoj konoplje dozvoljen samo za dobivanje sjemena u prehrambenoj industriji. [22]

#### 4.4.1. Struktura vlakana industrijske konoplje

Konopljina vlakna su stabljična vlakna, koja nastaju prirodnim sintezom u kori stabljike. Stabljika se naziva još i liko, pa se za stabljična vlakna rabi i naziv likova vlakna. Likova ili stabljična vlakna sastoje se od celuloze i nevlaknatih tvari (lignina, voskova, pigmenata i dr.) U kori stabljike vlakna su sljepljena u snopiće pektinom ili biljnim ljepilom, snopići su drugačije spojeni u različitim biljkama, kod konoplje su snopići raspoređeni u više prstena, slabo su povezani, vlakanca imaju tanje stijenke te su više odrvenjela. Vegetacijsko razdoblje od sjetve do žetve ovisi o vrsti biljke, klimatskim uvjetima, sastavu tla i sl. te iznosi od 90 do 180 dana. Stabljika pojedinih vrsta konoplje može narasti do visine čak 3,5 m premda je prosječno manja. Od 100 kg sirove stabljike dobiva se 8 do 15 kg vlakna. [26]

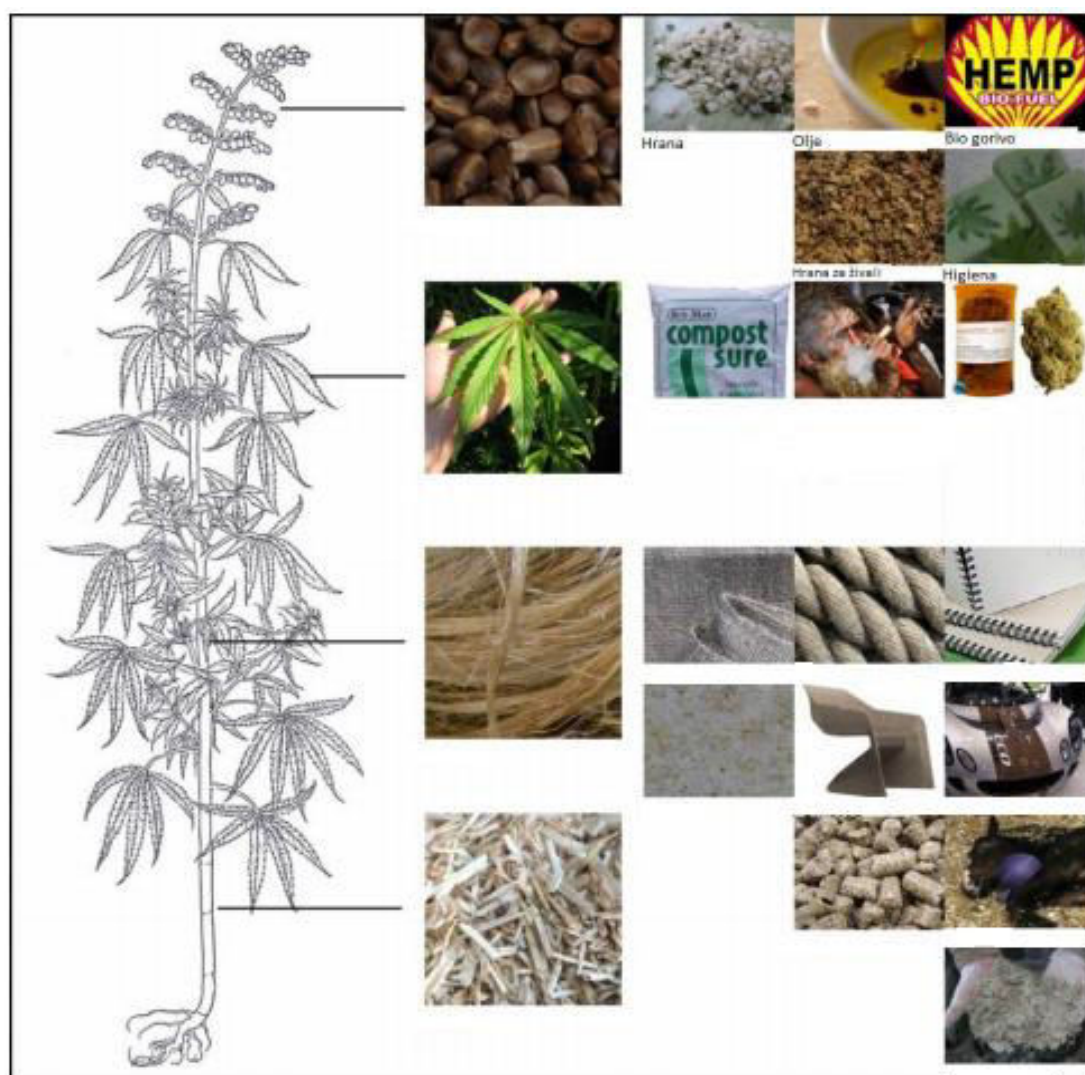
Visina, debljina i razgranatost stabljike ovise ne samo o podneblju i ekoraznolikosti, već i o gustoći sjetve. Na stabljici se nalaze dlanasti listovi koji broje od 3 do 13 listova s nazubljenim rubovima i svijetlozelenom bojom. Kod većine sorti listovi se sastoje od 7 do 9 listića. Veći broj listova nalazi se u sredini biljke. Sastav vlakna industrijske konoplje prikazan je na slici 4.17. [27]



Slika 4.17. Shematski prikaz sastav vlakna industrijske konoplje od stabla pa sve do mikrovlakana [27]



Sama biljka industrijske konoplje u potpunosti je iskoristiva (slika 4.18). Od stabljike do sjemena može se dobiti čak nekoliko tisuća različitih proizvoda. Gledajući strukturu biljke ona se sastoji od dva dijela. Vrh biljke sadrži 90 posto sjemena, nekih 30 centimetara od vrha prema dolje rabi se za prerađu prehrambenih proizvoda (čaj, ulje, brašno, proteini i ostalo). Donji dio stabljike prerađuje se u vlakno koje se primjenjuje u raznim vrstama industrija (auto, tekstil, užad, izolacija i tako dalje). [28] Iz donjeg dijela stabljike dobivaju se i nama toliko tražena vlakna koja su izrazito prikladna za proizvodnju polimernih kompozita.



Slika 4.18. Raznolikost uporabe pojedinih dijelova industrijske konoplje [27]



U moru proizvoda koji se mogu dobiti ovom biljkom, a neki procjenjuju da se ta brojka kreće čak i do 20 000 tisuća različitih proizvoda. Prikazati će se neke od najučestalijih. Sjeme konoplje primjenjuje se uglavnom u prehrambene svrhe, te za proizvodnju ulja. Iz ulja je moguća i proizvodnja bio-dizela kao pogonskog goriva. Iz lišća konoplje dobiva se visokohranjivi kompost. Iz najzanimljivijeg dijela iz kojeg se dobivaju prirodna vlakna slijedi širok spektar proizvoda. Prirodna vlakna industrijske konoplje upotrebljavaju se za proizvodnju tekstila, užadi, namještaja, za proizvodnju kompozita, ali i kao gorivo za proizvodnju bioetanola. Naposljetku donji dio biljke se može uporabiti i kao biomasa za ogrjev. [27]



Slika 4.19. Primjer poprečnog presjeka stabla industrijske konoplje (lijevo ) i indijske konoplje koja se koristi kao droga ( desno ) [27]

Industrijska konoplja je biljka koja posjeduje šuplju stabljiku (slika 4.19), koja ima vrlo visok sadržaj vlakana (35 %), za razliku od marihuane, koja ima punu stabljiku s malom šupljinom i niskim sadržajem vlakana (15 %). [27]

#### 4.4.2. Kompoziti od prirodnih vlakana industrijske konoplje

Polipropilen (PP) je jedan od najčešće rabljenih polimera koji ima nekoliko prednosti, uključujući dobra mehanička svojstva, dobru korozijsku postojanost, postojanost na vremenske uvjete, malu masu i nisku cijenu. Mala masa i dobra mehanička svojstva PP čine ga idealnim materijalom u automobilske industriji. Međutim, PP nije biorazgradiv i upravo uporabnog vijeka sačinjava značajan dio otpada koji izaziva povećanu brigu za okoliš. Međutim, uporabom prirodnih vlakana i PP u ulozi matrice čini ovaj polimerni kompozit ekološki prihvatljivijim u usporedbi s čistim polipropilenom. Pored ušteda s aspekta troškova i očekivanih ekoloških prednosti, glavna motivacija za uporabu prirodnih vlakana konoplje povezana je s mehaničkim i toplinskim svojstvima. [29]

Kao što je prethodno spomenuto, jedan od načina da se smanji količina sintetskih polimera je dodati udio prirodnog materijala u polimeru. Uporaba prirodnih vlakana konoplje u polimernim kompozitima neprestano je u porastu zbog svojih izvanrednih svojstava koja možemo vidjeti u tablici 4.5 i tablici 4.6, kao što su rastezna čvrstoća i modul rasteznosti. [29]

Tablica 4.5. Svojstva vlakana konoplje [30]

Materijal vlakana	Gustoća, g/cm <sup>3</sup>		Duljina, L mm		Promjer, D mm		$\frac{L}{D}$	Rastezna čvrstoća, N / mm <sup>2</sup>
	Vlakno	Snop	Raspon	Srednja vrijednost	Raspon	Srednja vrijednost		
Lan	1,51	1,2	10 – 65	32	10 – 25	18	1,778	357
KENAF (list)	-	1,2	1,4 – 5	2,6	14 – 23	21	124	406
KENAF (srčika)	0,31	-	0,4 – 1,1	0,6	18 – 37	30	20	-
KONOPLJA	1,48	1,2	7 - 5,5	25	13 – 30	18	1,087	826
BOR	0,51	-	2,7 – 4,6	3,7	32 – 43	38	97	81,2
JELA	0,48	-	2,7 – 4,6	3,7	32 – 43	38	97	109,2
JASIKA	0,39	-	0,7 – 1,6	1,2	20 - 30	25	48	51,8

Tablica 4.6. Gustoća i modul rasteznosti prirodnih vlakana [30]

Vrsta vlakna	Gustoća g/cm <sup>3</sup>	Modul rasteznosti GPa
E-staklo	2,55	73
Konoplja	1,48	70
Lan	1,4	60-80
Juta	1,46	10-30
Sisal	1,33	38
kokos	1,25	6
Pamuk	1,51	12

Utjecaj na vlačna i savojna mehanička svojstva kompozita ojačanog vlaknima konoplje ima i dužina vlakana koja se primjenjuje. Naime, duža vlakna djeluju neprikladnije na mehanička svojstva u usporedbi sa kraćim vlaknima. U polimernom kompozitu sa samo 10 % vlakana konoplje i 90 % PP pokazalo se da su vlačna čvrstoća i modul elastičnosti kompozita bili 20% veći nego kod čistog PP. Povećanjem udjela prirodnih vlakana konoplje u polimernom kompozitu rezultira i povećanom vlačnom čvrstoćom kompozita. Uz pozitivne aspekte upotrebe prirodnih vlakana konoplje moramo paziti i na one negativne, a to je prije svega da su takva vlakna higroskopna tj. da apsorbiraju vlagu što djeluje negativno na mehanička svojstva. [29]

#### 4.4.3. Primjena vlakana industrijske konoplje u kompozitima

Henry Ford je 1941. godine predstavio prvi automobil od kompozita s konopljinim vlaknima prikazan na slici 4.20. Henry Ford je na demonstraciji automobila čekićem udario po poklopcu prtljaga i karoserija se pod udarcima nije bila udubila, a kamoli razbila. Automobil iste veličine napravljen od konoplje težio bi 900 kilograma, što naravno utječe i na potrošnju goriva. [31]



Slika 4.20. Prva karoserija od kompozita konoplje automobila Henry Forda [6]



Slika 4.21. Automobil Lotus-Eco-elise napravljen od kompozita konoplje [31]

Komadi uličnog namještaja: vaze za biljke, koševi za papir i prijenosna kabina prikazani na slici 4.22 izrađeni su od ekstrudiranog PVC-a (40 %) s kratkim konopljinim vlaknima (60 %) kao ojačavalom, što je rezultiralo vrlo krutim materijalom, postojanim na vanjske utjecaje. [18]



Slika 4.22. Ulični namještaj proizveden od ekstrudiranog PVC-a s konopljinim vlaknima [18]

Prema studiji koja se odnosi na kućanske aparate u domaćinstvu, 55% francuskih građana smatra da su karakteristike utjecaja na okoliš kućanskog aparata važnije od njegove cijene, što upućuje na dobre izgleda za većom potražnjom takvih proizvoda u budućnosti. [18]

Jedan proizvođač već je ugradio 30 % prirodnih vlakana konoplje u svoje pegle na paru, postignuvši smanjenje mase i poboljšana oporabna svojstva. [18]



Slika 4.23. Parna pegla s 30 % vlakana konoplje [18]



Slika 4.24. Fotelja od kompozita s konopljinim vlaknima [31]



Slika 4.25. Tenisice od konoplje [31]





Slika 4.26. Gitare od kompozita s konopljinim vlaknima [31]



Slika 4.27. Naočale od kompozita s konopljinim vlaknima [31]



Slika 4.28. Maska za mobitel od kompozita s konopljinim vlaknima [31]

## 5. ZAKLJUČAK

Kompozitni materijali kao i prirodna vlakna u njima predstavljaju zasigurno jednu od novijih vrsta materijala čija se ekspanzija u široj primjeni zasigurno tek očekuje. Danas u vrijeme kada se stavlja naglasak na ekologiju i zaštitu okoliša prirodna vlakna pružaju mogućnost neiscrpnog, lako dostupnog, obnovljivog izvora sirovina i time je ispunjen osnovni preduvjet održive proizvodnje. Također, namjenski uzgoj ovakvih sirovina apsorbira velike količine ugljikovog dioksida, te u prosjeku polimerni kompoziti od prirodnih vlakana zahtijevaju oko 30 % manje energije pri svojoj proizvodnji u usporedbi s konvencionalnim polimerima.

Pored ekoloških preduvjeta, prirodna vlakna imaju i vrlo dobra mehanička svojstva u svojoj primjeni. Prije svega to se odražava na značajno smanjenje mase, pa stoga ne čudi što je automobilska industrija jedan od prvih začetnika proizvodnje polimernih kompozita ojačanih prirodnim vlaknima jer je time izravno utjecala na smanjenje potrošnje goriva. Naime, elastičnost materijala, viša savojna čvrstoća, veća otpornost na pucanje, izraženija žilavost čine široki spektar mehaničkih svojstava. Naravno niti jedna od navedenih prirodnih vrsta vlakana koja je ovim radom obrađivana ne sadrži sve navedene karakteristike. Ovisno o inženjerskim zahtjevima ovisit će i vrsta materijala tj. vlakana u polimernim kompozitima. Ako je naglasak isključivo na smanjenju mase, uporabit ćemo bambusova vlakna koja imaju 30 % manju gustoću u odnosu na vlakna banane. Ako su zahtjevi usmjereni na prekidnu čvrstoću rabit ćemo lan, dok konoplja posjeduje višu rasteznu čvrstoću.

Jedan od izazovnih ciljeva prirodnih vlakana je proširiti njihova uporaba u proizvodnji svakodnevnih proizvoda visokih performansi. Za to je potrebno optimizirati kvalitetu vlakana, razviti učinkovitije proizvodne tehnike koje će utjecati na smanjenje negativnih svojstava prirodnih vlakana; primjerice smanjenje apsorpcije vlage i poboljšati kompatibilnost između matrice i vlakana. Uz sve to valja voditi računa da upotreba prirodnih vlakana može biti snažan impuls razvoju poljoprivrede i imati značajan utjecaj na gospodarstvo. Masovnijom proizvodnjom prirodnih vlakana zasigurno će se i njihova cijena smanjivati, što se u bliskoj budućnosti i očekuje.



## 6. LITERATURA

- [1] Amar K. Mohanty, Manjusri Misra, Lawrence T. Drza: Natural Fibers, Biopolymers and Biocomposites, Taylor and Francis Group, 2005.
- [2] Haramina T.: Recikliranje kompozitnih materijala, autorizirano predavanje, FSB, 2012
- [3] Schauperl Z.: Kompozitni materijali, autorizirano predavanje, FSB, 2015
- [4] Maric G.: Materijali II, autorizirano predavanje, FSB, 2012.
- [5] Brunšek R., Pavunc M., Vujasinović E.: Tradicijski lan za sigurnu budućnost, Zagreb. 2015
- [6] Dujmušić I.: Nevjerojatna korisnost konoplje, Matrix World, 2012.
- [7] Nader F. <http://fnader.com/FormerCars.htm> (15.12.2016.)
- [8] [http://mohan.mse.gatech.edu/Research/stereocomplex\\_fiber/fig2.JPG](http://mohan.mse.gatech.edu/Research/stereocomplex_fiber/fig2.JPG) (15.12.2016.)
- [9] Kompozitni materijali <https://ironlady003.wordpress.com/2014/05/12/kompozitni-materijali/> (15.12.2016.)
- [10] Vučemilović Grgić S.: završni rad ,Uloga kompozitnih materijala u konstrukciji letjelica,Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2016.
- [11] Suhaily S. S., Khalil A.; Bamboo Based Biocomposites Material, Design and Applications, School of Industrial Technology, Universiti Sains Malaysia, Penang, Malezija
- [12] Review A., Venkateshwaran N., Elayaperumal A. : Banana Fiber Reinforced Polymer Composites / Journal of Reinforced Plastics and Composites, August 2010.
- [13] CyberPedia [http://cyberpediaa.blogspot.hr/2015\\_05\\_01\\_archive.html](http://cyberpediaa.blogspot.hr/2015_05_01_archive.html) (13.1.2017.)

- [14] Salgado A. F., Muylaert M. F., Custódia C. T., Figueiredo A. B., Oliveira B. F., Monteiro S. N.: Photoacoustic Thermal Characterization of Banana Fibers, 2015
- [16] Hrvatska enciklopedija <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=35276> (19.1.2017.)
- [17] <http://www.agroklub.ba/ratarstvo/zavrsena-zetva-lana-na-poljima-bosanskog-petrovca/20143/> (19.1.2017.)
- [18] Gomina M.: Flax and Hemp fibres: a natural solution for the composite industry- Flax and hemp composite applications, JEC composite, 2012.
- [19] Libo Y., Jayaraman K., Chouw N.: Flax fibre and its composites;. Composites Part B Engineering, August 2013
- [20] Milardović G.; Kompoziti u automobilske industriji, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu, Polimeri 32(2011), 3-4.
- [21] <http://www.sense4.me/2012/en/rad-lab> (19.1.2017.)
- [22] Cannabis sativa, Indian hemp, <https://www.britannica.com/plant/hemp> (8.1.2017.)
- [23] Plastika od konoplje i kako može promeniti svet, Bojan vučković <http://irka.org.rs/plastika-od-konoplje-i-kako-moze-promeniti-svet/> (18.1.2017.)
- [24] [http://www.konopljinahisahemphouse.si/uploads/1/8/1/6/18160119/\\_8893926\\_orig.jpg](http://www.konopljinahisahemphouse.si/uploads/1/8/1/6/18160119/_8893926_orig.jpg) (18.1.2016.)
- [25] Milardović F.: Rad za dodjelu rektorove nagrade, Biokompozit od konoplje i vapna, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2016
- [26] Malnar I.: Završni rad, Utjecaj vlaknaca konoplje na kemisku stabilnost otisaka, Grafički fakultet, Zagreb, 2016
- [27] <https://dk.um.si/Dokument.php?id=91437> (21.1.2017.)

[28] Uzgoj industrijske konoplje isplativ je posao

<http://varazdinski.rtl.hr/gospodarstvo/marko-cerjan-uzgoj-industrijske-konoplje-isplativ-je-posao-predrasude-nisu> (21.1.2017.)

[29] Polypropylene/hemp woody core fiber composites: Morphology, mechanical, thermal properties, and water absorption behaviors

<http://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1687814016638318> (21.1.2017.)

[30] Postupci proizvodnje kompozita, Marić G., Filetin T.

[https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1426604989-0-pred6.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1426604989-0-pred6.pdf) (21.1.2017.)

[31] Papadopoulou E., Koundouras S., Stathopoulos C., Bikiaris D., Chrissafis K.; Value-added industrial products from fibercrops, 2013 FIBRA Network - Summer school, Catania, Italy

---

## **PRILOZI**

1. CD-R Disc